

유동공진을 위한 가진기 설계 및 평가

남윤수*, 최재혁**

Design and Evaluation of a Vibration Exciter for the Flow Resonance

Yoonsu Nam*, Jaehyuck Choi**

ABSTRACT

A heat dissipation technology using flow resonant phenomenon is a kind of new concept in heat transfer area. A vibration exciter is needed to generate an air turbulence which has the natural shedding frequency of a heat system. A mechanical vibrating device for the air flow oscillation is introduced, which is driven by a moving coil actuator. An analytical dynamic model for this mechanical vibration exciter is presented and its validity is verified by the comparison with experimental data. Values of some unknown system parameters in the analytic model are estimated through the system identification approach. Based on this mathematical model, a high bandwidth vibration exciter is designed using feedback control. During the experimental verification phase, it turns out the high frequency modal resonant characteristics of vibrating plate are the major barrier against obtaining a high bandwidth vibration exciter.

Key Words : Vibration Exciter (가진기), System Identification (시스템 규명), Vibration Suppression Control (진동억제 제어), Moving Coil Motor (가동코일 모터)

1. 서 론

음향공명 방열기술은 기존의 열시스템 내부구조를 변화시키지 않고 대류 열전달의 촉진을 위하여 단순히 냉각유체 유동의 자연적인 불안정성을 이용하는 것으로, 냉각유체의 유속을 증가시키거나 냉각유체의 교환 없이 음향을 이용하여 특정주파수의 미소 유동교란을 냉각유체에 가함으로써 유로내 유동에 공명현상을 유발시켜 열전달을 촉진시키는 혁신적인 방법이라고 할 수 있다. 유로내의 냉각 유체는 고온의 발열 칩(chip)을 지남에 따라 유동의 박리(flow separation)에 의한 전단층

(shear layer)을 형성하게 되며, 이때 유동의 불안정성에 의해 유동 고유의 주파수를 갖는 와류(vortices)를 방출하게 된다. 이 주기적인 와류의 주파수가 열 시스템의 고유흐름 주파수(natural shedding frequency)가 된다. 따라서 냉각유체의 유동에 열 시스템의 전단층 불안정성에 기인하는 고유흐름 주파수와 일치하는 유동 교란성분으로 음향을 가함으로써 공명(resonance) 현상을 일으켜 열전달을 혁신적으로 촉진시킬 수 있다^[1-3].

위와 같은 유동공진 방열현상을 가능하게 하기 위하여는 열 시스템으로 고유흐름 주파수를 갖는 유동교란을 외부에서 공급하여야 한다. 즉, 열 시

2001년 1월 9일 접수

* 강원대학교 기계·메카트로닉스 공학부

** 강원대학교 대학원 메카트로닉스 전공

시스템의 고유흐름 주파수와 동일한 주파수로 열 시스템 내부의 유체를 교란시키기 위한 가진기(vibration exciter)가 필요하다. 본 연구에서 제안된 가진기는 가진 운동판의 무게를 최소화할 수 있는 가동코일(moving coil)형 액추에이터에 의하여 구동되며, 고 대역폭 가진 특성(high bandwidth excitation characteristic)을 얻기 위하여 피드백 제어 구조를 갖게 된다. 고 대역폭 가진 시스템 설계를 위한 첫 단계는 가진기의 운동을 표현하는 동적 모델을 정확히 기술하는 것이다. 이를 위하여 가진기 운동판의 고차 진동 모드가 포함되지 않은 단순한 3 차의 해석적 모델이 제시되었고, 이 모델에서 사용된 미지의 시스템 상수(unknown system parameter) 값들은 시스템 규명(system identification) 방법에 의하여 추정되었다. 이와 같이 얻어진 해석적 모델에 근거하여 고 대역폭 가진 특성을 갖는 제어기가 설계되었고, 이의 성능이 실험을 통하여 입증되었다. 특히, 해석적 모델에서 무시되었던 가진기 운동의 고차의 구조 진동 모드들은 고 대역폭 제어 특성을 달성하는 데 있어서 주된 제한 요소로 작용하고 있음이 실험적으로 밝혀 졌다. 본 연구에서는 저역 통과 필터(low pass filter)가 가미된 노치 필터(notch filter)를 사용하여 이 문제를 해결하였지만, 보다 더 근본적인 해결책은 고차 진동모드의 주파수와 그 크기를 유리한 방향으로 설정할 수 있는 가진기 기계구조의 재 설계이다. 또한, 페루프 가진기 구조에서 가진 운동판의 변위를 측정하기 위하여 사용된 고가의 갭 센서(gap sensor)를 대체할 수 있는 변위 추정기(displacement estimator)가 제안되었다.

2. 가진 시스템의 구조 및 운동 모델

고 주파수 대역까지 공기 유동을 발생시킬 수 있는 가진기를 설계하기 위하여는 가진기의 기계적 고유 진동수는 일단 상당히 고 주파수 대역에 위치되어야 한다. 이를 위하여는 가진기의 운동판 무게가 작아야 하고, 또한 가진 운동판의 이동을 제한하는 스프링의 상수 값은 큰 값을 갖도록 설계하여야 한다. 따라서, 운동판의 구동부는 자연스럽게 보이코일형 액추에이터(voice coil actuator)가 선택된다. 한편, 운동판의 재질로서는 가공성이 우수하고 가벼운 금속에 속하며, 거의 자성을 띠

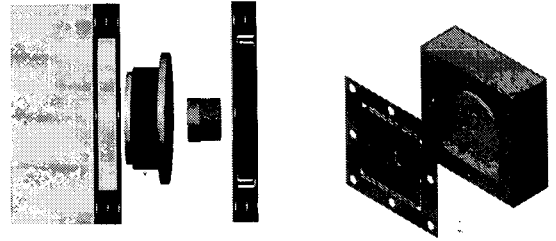


Fig. 1 Schematics of Vibration Exciter

지 않는 알루미늄이 사용되었다. Fig. 1 은 가진기의 전체적인 기계적 구조를 나타낸다. 플라스틱 외부 프레임에 영구자석이 고정되어 장착되고, 보이코일은 가진기의 운동판 중앙에 고정된다. 한편, 가진기의 운동판은 Fig. 2 와 같은 형상을 갖는다. 이 판의 둘레 부분은 단단하게 가진기 외부 프레임에 구속이 되어 있으며, 보이코일이 연결되어 있는 중앙 판만이 운동을 하게 된다. 또한, 이 판의 둘레 부분과 중앙 판은 4 개의 가는 폭을 갖는 유연 스프링(flexural spring)으로 연결되어 있다. Fig. 2 에는 가진기 운동판의 중앙에 1 Newton의 집중하중이 작용하였을 때, 운동판 변위에 대한 FEM 해석 결과가 포함되어 있다. 즉, 이 집중하중에 대하여 가진기 운동판은 Fig. 2 에 나타난 바와 같이 0.01512 m 병진 이동을 하게 되고, 이로부터 운동판의 등가 스프링 상수가 유추될 수 있다.

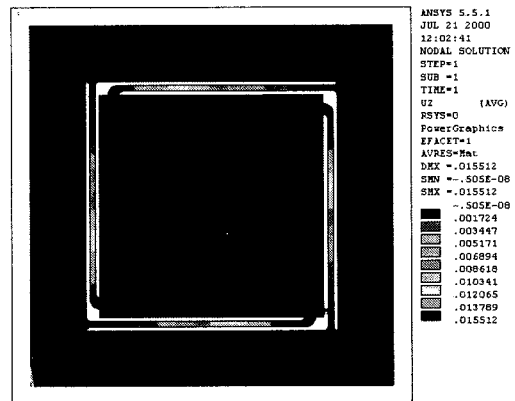


Fig. 2 Moving Plate of Vibration Exciter

Table 1 System Parameter Values used in Eq. (1)

Symbol	Description	Value	Unit
m	Mass of moving plate	9.1248×10^{-3}	Kg
c^*	Damping coefficient of flow vibrator	2.7877×10^{-3}	Newton/ (mm/s)
k	Spring constant of moving plate	6.6140×10^{-2}	Newton/ mm
R	Resistance of moving coil	4.7	Ω
L^*	Inductance of moving coil	10.69	mH
K_t^*	Force constant of moving coil motor	1.5880	Newton/ A
K_e^*	Back EMF constant of moving coil motor	0.001588	Newton/ (mm/s)
G_{sv}	Moving coil motor AMP gain	7.5858	Volt/ Volt

가진기의 운동을 기술하는 해석적 모델은 가진기 운동판에 대한 Newton 힘 관계식, 그리고 가동 코일회로에 관한 Kirhihoff 전압법칙을 적용하여 얻을 수 있으며, 아래의 식 (1)과 같이 가동 코일 모터 구동앰프 입력전압 (V)와 가진기 운동판의 변위(Y)에 관한 3 차 시스템이 된다.

$$\frac{Y(s)}{V(s)} = \frac{G_{sv}K_t}{mLs^3 + (Lc + mR)s^2 + (kL + cR + K_eK_t)s + kR} \quad (1)$$

위 식에서, m, c, k 는 가진 운동판의 질량, 댐핑, 스프링 상수를 의미하며, R, L, K_t, K_e 는 가동코일 모터의 저항, 인덕턴스, 힘 상수 (force constant), 역기전력 상수 (back EMF constant)를 각각 나타낸다. 한편, 가동코일은 National Semiconductor 사의 전류 증폭 IC 인 LM3886 에 의하여 구동되며, G_{sv} 가 그 증폭비를 나타낸다. 위에서 명시된 파라미터의 값들이 Table 1 에 정리되어 있다. 이 표에서 ‘*’의 위 첨자를 갖는 파라미터들은 그 값들이 측정이나 해석적인 추정을 통하여 결정될 수 없는 변수들로서, 다음 절에서 설명될 시스템 규명에 의하여 결정된 값들을 나타낸다.

3. 시스템 추정 (System Identification)에 의한 운동 모델

먼저 간략하게 실험 방법에 관한 소개를 한다. Fig. 3 의 페루프 구조에서 가진기 운동판의 변위 피드백 루프를 개방시킨 상태에서, Fig. 4 의 구조

에 의하여 생성되는 PRBS (Pseudo Random Binary Sequence) 신호를 가진기의 구동앰프로 입력시킨다. 이 때, 가진기 운동판은 중립 위치를 유지하고 있는 상태이다. Fig. 4 의 SIMULINK 모델은 MATLAB RTW (Real Time Workshop) 기능에 의하여 dSPACE DS1102 보드의 TMS320C31 DSP 기계어로 변환/ 다운로드된 후 실시간으로 실행된다. 이와 같이 생성된 PRBS 신호는 DS1102 보드의 채널 1 DAC 를 통하여 가진기 운동판을 가진시키고, 이에 의하여 생성된 운동판의 변위는 갭 센서 (gap sensor) 에 의하여 측정된 후 채널 2 ADC 를 통하여 DSP 보드로 입력된다. Fig. 4 의 PRBS 신호 생성회로는 시프트 레지스터 역할을 하는 12 개의 단위 지연기 (unit delay, z^{-1})와 모듈로 2 가산기 (modulo 2 adder) 인 배타적 OR 논리소자로 구성

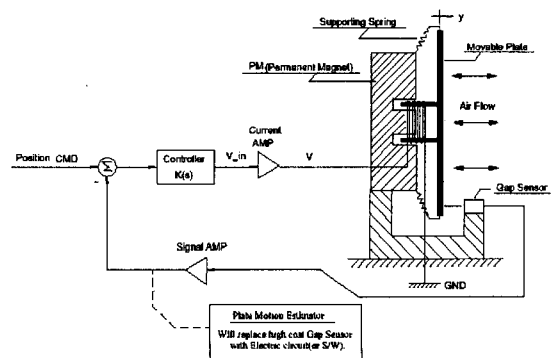


Fig. 3 Closed Loop Structure of Vibration Exciter

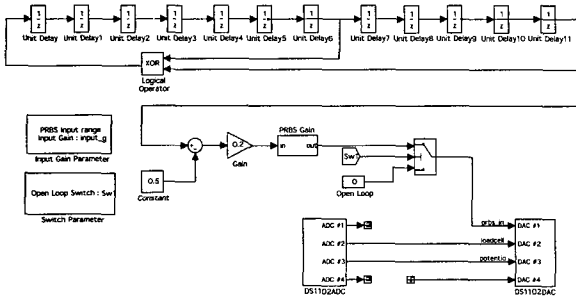


Fig. 4 SIMULINK Model for PRBS Generation

되어 있으며, PRBS 신호의 on/ off 을 위하여 스위치가 사용되고 있다. 또한, PRBS 출력 신호의 크기를 조절할 수 있도록 가변 게인 요소 (PRBS gain block)가 사용된다.

Fig. 4 의 회로에서 중요한 설계 인자는 단위 지연기에 연동된 샘플링 시간 (τ), 시프트 레지스터의 개수 (n), 그리고 PRBS 신호의 크기이다 [4-5]. 먼저, 샘플링 시간, τ 는 샘플링 정리 (sampling theorem)에 의하여 결정되며, 본 실험에서는 5 msec 으로 선정 되었다. 또한, PRBS 신호는 다음의 식 (2)로 결정되는 주기를 갖게 되므로, 레지스터의 개수를 12 로 정하게 되면 대략 20 초마다 PRBS 신호가 반복되게 된다. 이 시간은 가진기 운동판의 정착시간 (settling time) 보다는 충분히 큰 값이 된다.

$$T = (2^n - 1)\tau \geq \text{부하재현 장치의 정착 시간} \quad (2)$$

한편, PRBS 신호의 크기는 가진기의 운동판이 선형 작동영역을 벗어나지 않도록 하면서, S/N 비 (Signal to Noise Ratio)가 가능한 한 크게 되도록 선정하여야 한다. 위와 같은 실험 방법으로 얻어진 데이터에 대하여, 최소 자승법 (least square method)에 근거한 추정 모델인 ARX, ARMAX, OE, 그리고 상태 공간식 모델을 사용하여 부하재현 장치에 관한 시스템 규명이 수행되었다 [6].

PRBS 신호의 크기를 30 mV 하여 총 12 초간 얻어진 실험 데이터 중에서 처음 6 초 동안의 데이터는 시스템 규명을 위한 데이터로 사용되었으며, 다음 6 초 간의 데이터는 시스템 규명 결과를 평가하는데 사용되었다. Fig. 5 의 상위 두 그림은 초기 2 초간의 PRBS 신호 입력과 갭 센서로부터 측

정된 운동 판의 변위를 보여주고 있다. 상태 공간식 모델을 적용하여 얻어진 가진기 운동 추정모델이 ARX, ARMAX, OE 를 사용하여 추정된 모델보다 더 우수한 결과를 나타냈으며, 그 결과는 아래의 식 (3)으로 주어진다.

$$\frac{Y(s)}{V(s)} = \frac{1.2350 \times 10^8}{s^3 + 745.18s^2 + 1.6245 \times 10^5 s + 3.1868 \times 10^6} \quad (3)$$

위의 전달함수 단위는 (mm/ Volt) 이며, 이 식과 식 (1)로 주어지는 전달함수의 계수를 서로 비교 함으로서 Table 1 의 시스템 상수 값들을 추정할 수 있다. 또한, Fig. 5 의 마지막 Plot 은 6 초부터 9 초까지 입력된 PRBS 에 의한 운동판의 실제 변위와 동일한 PRBS 입력에 대하여 산출된 모델 출력신호를 나타낸다. 즉, 동일한 PRBS 를 식 (3)의 모델에 인가한 경우, 이동판의 변위가 점선으로 표현되어 있고, 갭 센서로 추정된 이동판의 실제 변위는 실선으로 나타나 있다. 이 그림에서 보듯이, 식 (3)의 추정모델은 실제 가진기의 운동 특성을 상당히 근접하게 표현하고 있음을 볼 수 있다. 이와 같은 논거는 Fig. 6 의 주파수 응답 비교로서 더욱 뒷받침된다. 이 그림에서 1 Hz 부터 800 Hz 주파수 대역에 걸쳐서 그려진 3 개의 실선은 실험적 주파수 응답을 의미하며, 굵은 점선으로 표시된 것은 식 (3)에 대한 주파수 응답을 나타낸다. 220 ~ 300 Hz 의 주파수 대역에서 나타나고 있는 가진 운동의 고차 진동 모드를 식 (3)의 모델이 표현하지 못한다는 단점이 있지만, 식 (3)은

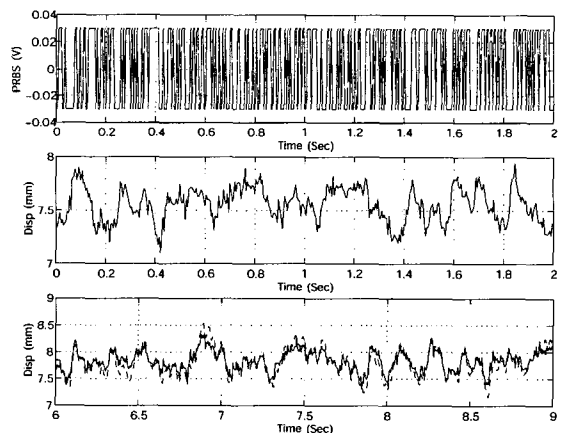


Fig. 5 PRBS and Measured/ Estimated Displacement

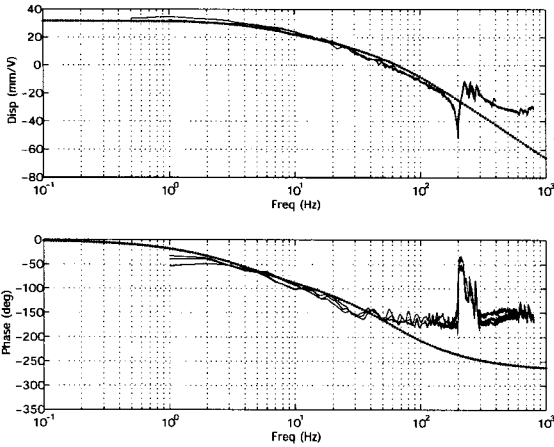


Fig. 6 Open Loop Frequency Response of Exciter

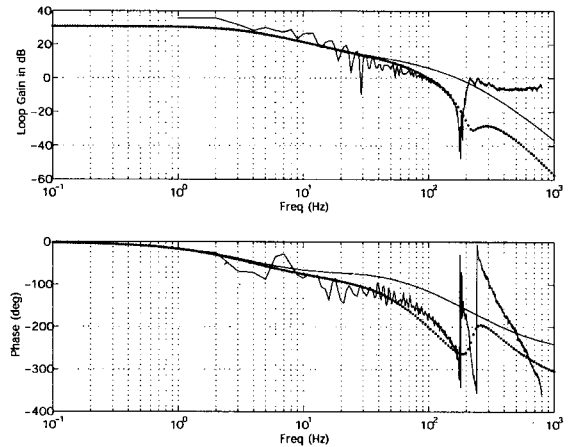


Fig. 7 Loop Gain Frequency Response of Exciter

DC 에서 100 Hz 까지의 주파수 범위에서는 실험적 데이터와 잘 일치하고 있다.

4. 페루프 가진 시스템 설계 및 평가

Fig. 6 으로 표현된 개루프 주파수 응답특성을 갖는 가진기 구조에 대하여, 가능한 한 최대의 대역폭을 제공할 수 있는 제어기를 설계하여 보자. Fig. 6 에서 주파수 응답의 크기선도를 살펴보면, 220 Hz 주파수 대역에서 나타나기 시작하는 고차의 구조 진동 모드의 크기가 100 Hz 근처에서의 크기와 거의 같은 값을 갖고 있음을 볼 수 있다. 따라서, 지금과 같은 기계적 특성을 갖는 가진기 구조에 대하여 100Hz 이상의 대역폭을 갖도록 제어기를 설계하는 것은 상당히 어려운 문제가 된다. 또한, Fig. 6 에서 100 Hz 주변에서의 위상지연 특성을 살펴보면, 실질적인 실험적 위상지연 값이 식 (3) 으로 예상되는 값보다 작게 나타나고 있다. 이것은 가진기의 해석적 개루프 모델인 식 (3)의 전달함수를 사용하여 페루프 시스템을 설계할 때, 그 결과는 안정성 (stability)과 과도응답의 성능면에서 항상 신중한 (conservative) 설계를 보장 함을 의미한다.

이제, 100 Hz 의 대역폭을 갖도록 페루프 가진기를 설계하여 보자. 대역폭 확장을 위하여 일반적으로 선택되는 위상 앞섬 필터 (PLF: Phase Lead Filter)가 사용되었다. 아래의 식 (4)는 사용된 PLF

를 표현하며, 100 Hz 근처에서 대략 90°의 위상 보상 (Phase Compensation)을 할 수 있도록 설계되었다.

$$K_1(s) = \frac{0.8903(1 + 0.0038985s)^2}{(1 + 0.00064975s)^2} \quad (4)$$

그러나, 식 (4)의 PLF 를 현재의 가진 시스템에 그대로 사용하게 되면, 앞서 언급된 고차의 공진모드 영향으로 설계된 페루프 시스템은 불안정 해진다. 이것은 PLF 가 고 주파수 대역에서의 게인을 크게 하기 때문이다. 즉, PLF를 사용하게 되면, 루프 게인 보드 선도 (loop gain Bode Plot)에서 고차 공진모드의 크기는 0 dB 보다 크게 되어 페루프 시스템은 불안정해진다. 이를 해결하기 위하여, 아래의 식 (5)와 같이 100 Hz 의 차단 주파수를 갖는 1차 LPF (Low Pass Filter)와 함께 220 Hz 노치 필터가 사용되었다.

$$K_2(s) = \frac{1}{1 + s/628.3} \cdot \frac{(s/1382.26)^2 + 0.2s/1382.26 + 1}{(s/1382.26)^2 + 0.2s/1382.26 + 1} \quad (5)$$

Fig. 7 은 제어기 특성이 고려된 가진기의 루프 게인 주파수 응답을 의미한다. 이 그림에는 실험적인 주파수 응답 선도와 함께 두 개의 해석적인 주파수 응답 선도가 그려져 있다. 이중 실선으로 표현된 것은 가진기의 개루프 전달함수에 식 (4)의 PLF 제어기만 고려한 루프 게인에 대한 주파수 응답 선도이며, 굵은 점선으로 표시된 것은 식 (4)

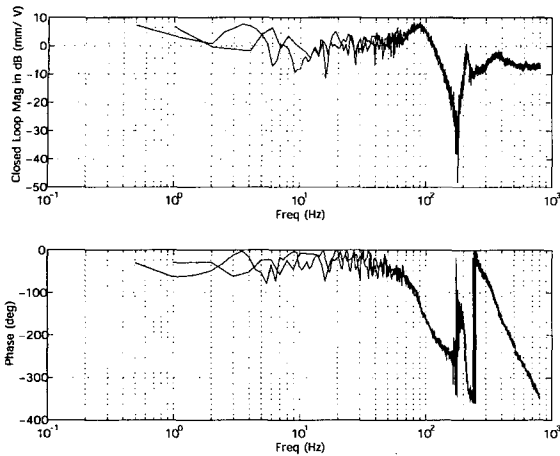


Fig. 8 Closed Loop Frequency Response of Exciter

와 식 (5)의 노치 필터를 함께 고려한 루프 게인에 대한 주파수 응답 선도이다. 식 (5)의 노치 필터를 사용한 대가는 200 Hz 이하의 주파수 대역에서 볼 수 있는 확연한 위상 지연으로, 100 Hz 인 크로스 오버 주파수 (crossover frequency)에서 위상 지연 값이 180° 보다 크게 나타나고 있다. 앞서 논의된 대로, 식 (3)을 사용하여 설계된 페루프 시스템은 항상 신중한 결과를 제공하게 되는데, 이는 식 (3)에 근거하여 설계된 해석적 페루프 시스템이 불안정하더라도, Fig. 7 에 나타난 바와 같이 실제적인 페루프 시스템은 대략 15° 정도의 위상 여유 (phase margin)를 갖고 있음을 의미한다. 또한, Fig. 7 에 의하면, 식 (4)와 (5)를 사용하는 페루프 시스템은 거의 0 dB 의 게인여유 (gain margin)을 갖게 된다. 그러나, 현재의 구조에서 게인 여유를 증가시키는 것은 상당히 어려운 문제이다. 페루프 시스템에 더 큰 값의 게인여유를 주기 위하여 식 (5)에 고차의 LPF 를 추가하게 되면 위상여유가 감소하게 되기 때문이다. 식 (4)의 PLF 와 식 (5)의 노치필터를 적용한 페루프 시스템의 주파수 응답 선도가 Fig. 8 에 표시되어 있다. 대략 100 Hz 의 대역폭을 갖게 되어 목표 설계 요구조건을 만족시키고 있음을 알 수 있다.

또한, Fig. 9 에 페루프 가진기의 시간영역 응답 특성이 정리되었다. 이 그림에는 2 Hz 의 구형파, 10 Hz 의 삼각파, 그리고 20 Hz, 40 Hz, 및 100 Hz 의 정현파 입력에 대한 페루프 가진기의 응답특성

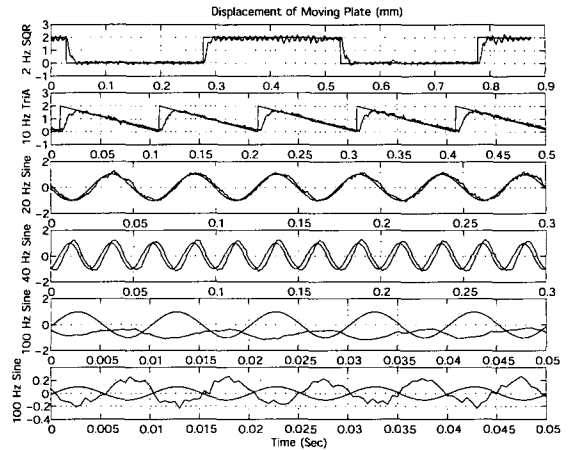


Fig. 9 Time Domain Responses of Vibration Exciter

이 순서대로 그려져 있다. 특히, 100 Hz 의 2 V_{pp} 정현파 입력에 대하여 가진기는 대략 40% 정도까지만 추종하고 있는 것을 볼 수 있다. 그 이유는 가동코일 모터를 구동하는 구동앰프의 최대 출력이 68 WATT 이기 때문에 발생하는 것이다. Fig. 9 의 마지막 Plot 에서 볼 수 있듯이, 100 Hz 정현파 입력 신호의 크기를 0.2 V_{pp} 로 작게 하면 가진기의 변위는 그 명령신호를 충분히 추종하게 된다.

5. 가진 운동판 변위 추정기 설계

스트레인 게이지 (Strain Gage)를 사용하여 가진기 운동판의 변위를 추정할 수 있다. Fig. 2 의 가진기 운동판 구조에서, 대각선 상으로 배치된 임의의 한 쌍 유연 스프링 (flexural spring)에 두 개의 스트레인 게이지가 부착 되었다. 즉, 한 쪽 스프링의 상단 지지부에, 그리고 또 다른 한 쪽 스프링의 하단 지지부에 스트레인 게이지를 각각 부착시키면, 가진 운동판의 변위에 따라 한 스트레인 게이지는 인장력 (tension), 그리고 다른 스트레인 게이지에는 압축력 (compression)이 발생되어 스트레인 게이지의 저항 값이 변하게 된다 [7]. 운동판 변위에 의한 저항 변화량은 아래의 그려진 Fig. 10 의 회로에 의하여 전기적인 신호로 변환 될 수 있다. Fig. 10 의 Wheatstone Bridge 에서 R₂와 R₄는 스트레인 게이지를 의미하고, R₁과 R₃는 스트레인 게이지의 공칭 저항 값에 해당하는 일반 저항으로 구성된다. 사용된 스트레인 게이지의 게이지 상수

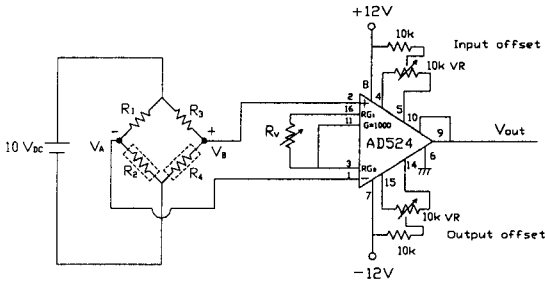


Fig. 10 Signal AMP for Strain Gage

(gage factor)를 S_g , Wheatstone Bridge 로 입력되는 DC 전압을 V_s , 그리고 계측 OP AMP 인 AD524 의 이득을 K_{524} 라 할 때, 가진기 운동판의 변위 (y) 와 Fig. 10 회로의 출력 전압 (V_{OUT})은 아래의 식 (6)과 같은 관계를 갖는다.

$$V_{OUT} = \frac{K_{524} V_s S_g b k L}{8 E I} y = K_{SG} y \quad (6)$$

위 식에서 b, L , 그리고 I 는 Fig. 2 에 그려진 유연 스프링의 두께, 길이, 그리고 단면적 관성 모멘트 (area moment of inertia)를 각각 의미하며, E 는 AL의 Young's Modulus 이다. 따라서, 식 (6)의 관계에 의하여 가진기 운동판의 변위를 추정할 수 있다.

6. 결론

본 연구를 통하여 대략 100Hz 정도의 대역폭을 갖게 되는 유동공진을 위한 가진 시스템이 설계되었다. 가진기의 기계적 구조에 의하여 발생하는 고차 진동모드들이 고 대역폭 가진기 설계의 주요 저해 요인이 됨을 알 수 있었다. 따라서, 현재 제작된 가진 시스템의 안정도 여유 (stability margin)를 향상시키거나, 또는 보다 큰 대역폭을 갖는 가진기를 설계하기 위하여는 고차의 구조 진동모드의 주파수와 그 크기를 유리한 방향으로 설정할 수 있는 가진기 기계구조의 재 설계가 요구된다. 현재 진행되고 있는 연구 분야는 가진기 운동판의 변위를 측정하기 위하여 사용된 고가의 갭 센서를 저가의 스트레인 게이지를 사용한 변위 추정기 (displacement estimator)로 대체하기 위한 연구이다.

참고 문헌

1. Azar K., Enhanced cooling of electric components by flow oscillation, J. Thermophysics and Heat Transfer 6, pp. 700-706. , 1992.
2. Greiner, M, "An experimental investigation of resonant heat transfer enhancement in grooved channel," Int. J of Heat Mass Transfer, 34, pp. 1383-1391., 1991.
3. 강병하, 김서영, "유동공진을 이용한 열전달 촉진 기술," 대한기계학회 기계저널, 제 39 권 3 호, 1999.
4. Ljung, L., "System Identification, Theory for the User," Prentice Hall, 1987.
5. Brown, R. G., "Introduction to random Signal Analysis and Kalman Filtering," John Wiley & Sons, 1983.
6. Ljung, L., "System Identification Toolbox for Use with MATLAB," MathWorks, 1997.
7. Doebelin, E. O, "Measurement Systems Application and Design," McGraw-Hill, 1990.